



نشریه علمی پژوهشی
کامپوزیت
علوم و فناوری
<http://jstc.iust.ac.ir>



بررسی میزان ورقه شدن در فرآیند فرزکاری مارپیچ بر روی کامپوزیت پلیمری تقویت شده با الیاف کربن

عماد حکیمی^۱، سعید امینی^{۲*}

۱- دانشجوی کارشناسی ارشد، مهندسی مکانیک، دانشگاه کاشان، کاشان
۲- دانشیار، مهندسی مکانیک، دانشگاه کاشان، کاشان
* کاشان، صندوق پستی، ۸۷۳۱۷۵۳۱۵۳، amini.s@kashanu.ac.ir

چکیده	اطلاعات مقاله
<p>کامپوزیت‌های تقویت شده با الیاف کربن (CFRP) به علت داشتن نسبت استحکام بالا به وزن پایین روز به روز در صنایع مختلف، نظیر صنایع هوا فضا و خودروسازی در حال گسترش می‌باشند. با توجه به ضریب انبساط حرارتی متفاوت بین الیاف و رزین در کامپوزیت‌های پلیمری، سوراخ کاری این مواد یکی از عملیات مشکل برای ایجاد قطعات نهایی است. از این رو روش فرزکاری مارپیچ در سال‌های اخیر با توجه به کاهش نیرو در ماشین کاری و ایجاد سوراخ به صورت یکباره (بدون نیاز به پیش مته) یکی از روش‌های نوین برای سوراخ کاری CFRP می‌باشد. در این پژوهش به بررسی میزان ورقه ورقه شدن با توجه به نیرو و پارامترهای ماشین کاری پرداخته شده است. برای تعیین مقدار پیشروی، سرعت برشی و زاویه شیار مارپیچ ابتدا چندین آزمایش اجرا و بر این اساس سه سرعت برشی، چهار سرعت پیشروی و یک زاویه شیار مارپیچ تعیین شد. پس از اجرای آزمایش‌ها نتایج به دست آمده نشان داد، میزان ورقه ورقه شدن رابطه مستقیم با نیروی محوری در طی عملیات ماشین کاری دارد. همچنین قطر سوراخ تولید شده نیز از عوامل تاثیرگذار بر معیار ورقه شدن (F_d) است که افزایش سرعت برشی و کاهش میزان پیشروی سبب تولید سوراخ با دقت بالاتر و کاهش معیار ورقه ورقه شدن می‌شود.</p>	<p>دریافت: ۹۴/۶/۱۶ پذیرش: ۹۴/۸/۱۱</p> <p>کلیدواژگان: کامپوزیت پلیمری تقویت شده با الیاف کربن فرزکاری مارپیچ ورقه ورقه شدن نیروی ماشینکاری قطر سوراخ</p>

Study of delamination in the process helical milling of carbon fiber-reinforced polymer composite

Emad Hakimi, Saeed Amini*

Department of Mechanical Engineering, University of Kashan, Kashan, Iran.
*P.O.B. 8731753153, Kashan, Iran, amini.s@kashanu.ac.ir

Keywords

CFRP
Helical milling
Delamination
Machining force
Hole diameter

Abstract

Carbon fiber-reinforced polymer composites (CFRP) due to the ratio high strength to weight down day by day growing in various industries, such as aerospace and automotive. Due to the different thermal expansion coefficient between the fibers and resin polymer composite drilling materials difficult to create one of the final parts. The helical milling method in the recent years due to the force reduction in machining and holes at once (no need to pre drill) is one of the new methods for drilling CFRP. In this study, amount delamination to be explored according to force and machining parameters. For determine the amount of the feed, cutting speed and screw pitch the several tests was conducted and Therefore three cutting speed, four speeds feed and one screw pitch was determined. After the experimental results showed that amount delamination has a direct relationship with the axial force during machining operations. Also diameter hole is produced factors influencing on the delamination factor (F_d). That increasing cutting speed and reduce feed production of the hole causes with to higher precision and reduced delamination factor.

۱- مقدمه

مواد و فرایندهای ساخت قطعه می‌نمایند تا یک محصول بی نقص تولید شود؛ اما در بسیاری از مواقع برای حذف زوائد و ایجاد سوراخ برای اتصالات نیاز به ماشینکاری است که این امر سبب ایجاد چالش‌های فراوان برای سازنده می‌شود.

امروزه با توجه به گسترش کاربرد قطعات کامپوزیتی در صنایع مختلف نظیر صنایع هوا فضا و خودرو سازی ماشینکاری کامپوزیت‌ها اهمیت فراوانی پیدا کرده است [۱]. گرچه مهندسیین زمان و منابع زیادی را صرف طراحی، انتخاب

Please cite this article using:

Hakimi, E. and Amini, S., "Study of delamination in the process helical milling of carbon fiber-reinforced polymer composite", In Persian, Journal of Science and Technology of Composites, Vol. 2, No. 4, pp. 51-58, 2016.

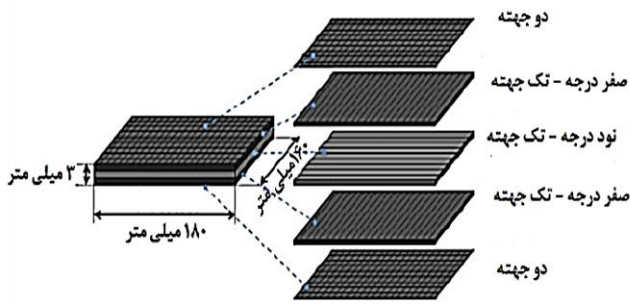
برای ارجاع به این مقاله از عبارت زیر استفاده نمایید:

فاصله بستن بین نقاط مختلف قطعه توسط یک قید و بند خاص را مورد مطالعه قرار دادند. در این تحقیق، از دو قید و بند استفاده شد که یکی به صورت صفحه‌ای و دیگری به صورت خطی مورد مقایسه قرار گرفت. این مقایسه نشان می‌دهد نیروی ماشینکاری در حالت خطی بیشتر از حالت صفحه‌ای می‌باشد. دکتا و همکاران [۸] عملیات فرزکاری ماریچ را بر روی یک قطعه شامل تیتانیوم و CFRP انجام دادند و به این مهم رسیدند که با افزایش نیروی نرمال، قطر سوراخ از اندازه دقیق خود کمتر شده است. تیچر و همکاران [۹] به روش تخلیه الکتریکی به سوراخ‌کاری بر روی کامپوزیت‌های تقویت شده با الیاف کربن پرداخت‌اند. نتایج این پژوهش نشان می‌دهد با افزایش انرژی پالاس سایش ابزار بیشتر شده و صافی سطح پایین آمده است. در صورتی که انرژی پالاس ثابت باشد افزایش جریان تخلیه سبب آسیب به رزین می‌شود. اگر از سایش ابزار، چشم پوشی شود انرژی پالس بالا و متوسط و جریان تخلیه پایین، سبب کارایی بهتر و کیفیت مناسب قطعه در فرآیند خواهد شد. هنریچس و همکاران [۱۰] مطالعاتی را در مورد براده قطعه CFRP با جهت الیاف‌های کربن مختلف انجام دادند و اذعان داشتند زبری سطح بالا نشان دهنده شکست مواد، دندان‌دندان شدن روی سطح یا الیاف نیم کنده شده و باقی مانده روی قطعه کار است. زبری سطح پایین نیز تضمینی بر این نیست که هیچ نقصی در قطعه کار وجود ندارد، زیرا تحقیقات آن‌ها نشان داد در زبری سطح پایین نیز احتمال ترک در زمینه وجود دارد. لیو و همکاران [۱۱] سوراخ‌کاری قطعه CFRP را به وسیله ارتعاش بیضوی چرخان مورد مطالعه قرار دادند. نتایج این پژوهش نشان می‌دهد این روش نسبت به سوراخ‌کاری معمولی سبب کاهش میزان براده چسبیده شده به ابزار شده است و از طرفی کاهش قابل توجه نیروی برش در خروجی سوراخ، کاهش میزان ورقه ورقه شدن در خروجی سوراخ را به همراه دارد. در این روش همچنین عمر ابزار و کیفیت لبه‌های سوراخ بهبود یافته است. والتز و همکاران [۱۲] در این پژوهش به بررسی و تجزیه و تحلیل گازهای خطرناک تولید شده در حین ماشینکاری کامپوزیت‌های تقویت شده با الیاف کربن به وسیله لیزر، با حضور رزین‌های گرما نرم و گرما سخت پرداخت‌اند. همچنین دریافت‌اند که استفاده از لیزر با قدرت بالا و ایجاد پالس‌های در محدوده زمانی، نانو ثانیه موجب کیفیت بهتر برش می‌شود. زمان و همکاران [۱۳] امکان کاهش بیرون زدگی الیاف کربن در هنگام ماشینکاری، CFRP را مورد بررسی قرار دادند و برای این کار از ماشینکاری به کمک ارتعاش استفاده کردند. نتایج آن‌ها نشان داد این روش ماشینکاری سبب افزایش عمر ابزار خواهد شد. استفاده از روش ارتعاشی نسبت به سوراخ‌کاری معمولی، شرایط ماشینکاری را بهبود بخشیده است. همچنین بیرون زدگی الیاف در جهت پیشروی و در مسیر ارتعاش دایره‌ای، کاهش می‌یابد. ریویرو و همکاران [۱۴] دستگاه برش لیزر CO₂ با قدرت پرتو بالا را به منظور بررسی قابلیت برش CFRP، مورد استفاده قرار دادند. نتایج نشان می‌دهد به علت تفاوت در خواص فیزیکی بین الیاف و رزین اپوکسی برش CFRP توسط برش لیزر دشوار است. در صورتی که برش لیزری CO₂ این شرایط را بهبود بخشیده است. همچنین استحکام کششی CFRP، بعد از عملیات برش نسبت به روش‌های ماشینکاری مکانیکی معمولی تغییری پیدا نکرده است. نویسنده اصلی مقاله در تحقیقات قبلی خود

استفاده از الیاف و رزین در کامپوزیت‌ها، شرایط خاصی را برای ماشینکاری ایجاد می‌کند. کامپوزیت پلیمری تقویت شده با الیاف کربن (CFRP) به علت نسبت بالا استحکام به وزن، نسبت بالا مدول کششی به وزن و استحکام بالای خستگی امروزه بسیار مورد توجه می‌باشد. سوراخ‌کاری کامپوزیت پلیمر مسطح شده با الیاف (FRP) با چالش‌های زیادی همراه می‌باشد. در هنگام سوراخ‌کاری این نوع کامپوزیت‌ها، الیاف به کار رفته به دلیل استحکام بالا به راحتی نمی‌شکنند، بلکه در آنها تمایل به بیرون کشیده شدن توسط ابزار وجود دارد که خود منجر به ایجاد ترک‌های کوچک و جدایش لایه‌ها در طول برش می‌شود. این پدیده سبب پایین آمدن کیفیت سوراخ و دقت ابعادی سوراخ می‌شود. از دیگر مشکلات سوراخ‌کاری این کامپوزیت‌ها ورقه ورقه شدن اطراف سوراخ است که رابطه مستقیم با نیروی ماشینکاری دارد. با توجه به تحقیقات صورت گرفته مشخص شده است فرآیند فرزکاری ماریچ، نیروی ماشینکاری را کاهش می‌دهد. به همین منظور برای کاهش میزان ورقه ورقه شدن این روش، روش مناسبی برای ایجاد سوراخ است.

ایسهدا و همکاران [۲] به بررسی سوراخ‌کاری به روش فرزکاری ماریچ به همراه ارتعاش اولتراسونیک و استفاده از گاز نیتروژن بر روی کامپوزیت تقویت شده با الیاف کربن پرداخت‌اند. نتایج در این پژوهش نشان می‌دهد، استفاده از ارتعاش اولتراسونیک به علت کاهش نیروی محوری، میزان ورقه ورقه شدن را کم می‌کند. همچنین استفاده از گاز نیتروژن به علت کاهش دمای ماشینکاری سبب افزایش عمر ابزار می‌شود. کاستر و همکاران [۳] با پوشش مته کاربایدی توسط نانو کریستال‌ها به بررسی عمر این ابزار در سوراخ‌کاری CFRP پرداخت‌اند. آن‌ها برای این تحقیق دو نوع پوشش و دو نوع هندسه مختلف ابزار را مورد استفاده قرار دادند. مطالعات این محققان نشان داد هندسه ابزار تأثیر بیشتری نسبت به نوع پوشش بر روی عمر ابزار در سوراخ‌کاری CFRP دارد. ایدریس و همکاران [۴] تأثیر هوای سرد بر روی عمر ابزار و کیفیت قطعه CFRP در طی عملیات فرزکاری را مورد مطالعه قرار دادند. در این مطالعه از هوای سرد ۱۰- درجه سانتی‌گراد استفاده شده است و برای به حداقل رساندن حرارت در ناحیه ماشینکاری سرعت برشی $160-200 \text{ m/min}$ و پیشروی $0.25-0.5 \text{ mm/rev}$ و ابزار کاربایدی بدون پوشش مورد استفاده قرار گرفت. تحقیقات صورت گرفته روی این موضوع مشخص کرد که در حضور هوای سرد عمر ابزار نسبت به نبود آن، در سرعت‌های برشی و پیشروی بالا افزایش پیدا کرده است. کلوتر و همکاران [۵] وضعیت‌های مختلف قید و بند بر روی کیفیت قطعه کار CFRP در عملیات سوراخ‌کاری را مورد بررسی قرار دادند. در این پژوهش از دو روش برای بستن قطعه کار استفاده شد. روش اول بستن چهار و روش دوم بستن سه نقطه از CFRP، در هر دو روش نتایج نشان می‌دهد، تغییر فاصله نقاط ثابت بستن قطعه تا محور مته (محل سوراخ) بر روی کیفیت قطعه کار و نیروی ماشینکاری تأثیر گذار است. لیو و همکاران [۶] به مطالعه تأثیر درجه حرارت، در فرآیند فرزکاری ماریچ بر روی CFRP پرداخت‌اند. آن‌ها برای محاسبه تولید گرما، در فرزکاری ماریچ یک مدل نیروی برش ارائه دادند و پس از انجام آزمایشات عملی و تطابق خوب این مدل با اطلاعات خروجی مشخص شد، تنها ۵٪ با هم در نتایج اختلاف دارند. کلوتر و همکاران [۷]

1 Carbon Fiber Reinforced Plastics (CFRP)
2. Fiber Reinforced Plastics (FRP)



شکل ۱ ساختار لمینیت‌ها

فرایندهای تراشکاری و سوراخکاری به کمک ارتعاش اولتراسونیک را بررسی نموده است [۱۵-۱۹].

تحقیقات انجام گرفته نشان می‌دهد، بررسی میزان ورقه ورقه شدن در مورد کامپوزیت‌های تقویت شده با الیاف کربن با توجه به گسترش این مواد، در صنایع هوایی از اهمیت بالایی برخوردار می‌باشد. از آنجایی که در تحقیقات گذشته حالت بهیته پارامترهای ماشینکاری برای تولید سوراخ بر روی CFRP با استفاده از فرآیند فرزکاری ماریپیج ارائه نگردیده بود در این پژوهش سعی شد با استفاده از روش نوین فرزکاری ماریپیج حالت بهینه پارامترهای ماشینکاری، برای کاهش میزان ورقه ورقه شدن با در نظر گرفتن میزان نیروی ماشینکاری و قطر سوراخ نهایی ارائه شود.

۲- آماده سازی فرآیند

۱-۲- قطعه کار و ابزار



شکل ۲ تیغه فرز هشت پر

قطعه کامپوزیتی تقویت شده با الیاف کربن به روش قالبگیری فشاری با پرس گرم تولید شده است. الیاف مورد استفاده پارچه کربنی تک جهت و دو جهت ساخت شرکت میتسوبیشی^۱ با وزن ۲۰۰ گرم بر متر مربع می‌باشد. اپوکسی ۸۲۸ نیز به عنوان رزین، در ساخت این کامپوزیت مورد استفاده قرار گرفته است. شکل ۱ ساختار قرار گرفتن لمینیت‌ها^۲ را نشان می‌دهد.

در شکل ۱ قطعه CFRP از ۵ لایه ساخته شده است. در دو لایه ابتدایی و انتهایی از الیاف دو جهت و در سه لایه ما بین آنها از الیاف تک جهت استفاده شد. علت استفاده از الیاف در جهات مختلف افزایش میزان استحکام قطعه کامپوزیتی در جهات مختلف می‌باشد. با توجه به خواص کند کنندگی CFRP و به طور کلی کامپوزیت‌های پلیمری بعد از مطالعات صورت گرفته تیغه فرز، تنگستن کارباید روکش دار هشت پر به قطر ۸ میلی‌متر ساخت شرکت WNT آلمان به کد ۵۲۷۱۶۰۸۰ مورد استفاده قرار گرفت. شکل ۲ تیغه فرز مورد استفاده در آزمایش‌ها را نشان می‌دهد.

با توجه به خواص CFRP ابزار با تعداد لبه‌های برشی بیشتر، سبب بالا رفتن کیفیت سطح و عمر ابزار می‌شود، زیرا هر لبه سهم کمتری از ماشینکاری را به خود اختصاص می‌دهد. به همین جهت تیغه فرز هشت پر نشان داده شده در شکل ۲ انتخاب شد.

۲-۲- جزئیات آزمایش

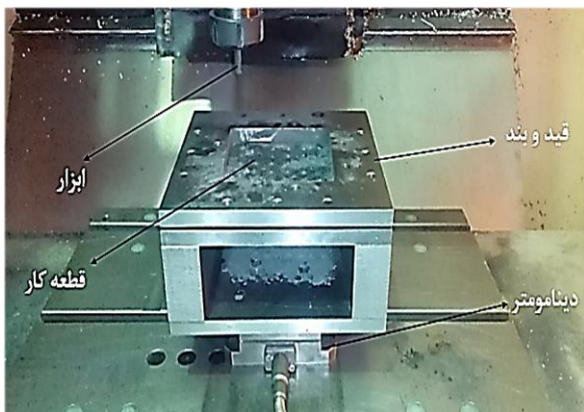
برای اندازه‌گیری نیرو، از دستگاه دینامومتر مدل 9257B ساخت شرکت کیستلر استفاده شده است. همچنین برای اندازه‌گیری و بررسی میزان ورقه ورقه شدن در اطراف سوراخ دستگاه اندازه‌گیری تصویری-مختصات^۳ به کار گرفته شد. مشخصات دستگاه VMM-CMM مورد نظر برای اندازه‌گیری تolerانس‌ها و میزان ورقه ورقه شدن همان‌طور که در شکل ۳ مشاهده می‌شود به شرح زیر می‌باشد.

از دستگاه به مدل EV-4030 با قطر پراب ۲ mm از نوع تماسی و با دقت $(3+L/200)\mu m$ استفاده شد.

شکل ۴ نحوه قرار گرفتن مجموعه آزمایش بر روی دستگاه فرز CNC سه محور همزمان، ساخت شرکت سینسیناتی^۴ آمریکا، مدل Sabra 750 را نشان می‌دهد.



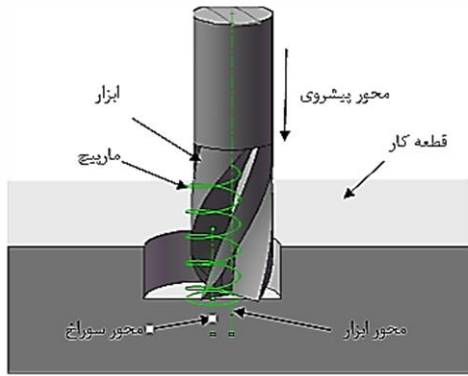
شکل ۳ دستگاه اندازه‌گیری تصویری-مختصات



شکل ۴ نحوه قرار گرفتن مجموعه آزمایش

1. Mitsubishi
2. Laminates
3. View Measuring Machine-Coordinate Measuring Machine (VMM-CMM)
4. Cincinnati

۳-۲- فرزکاری ماریپیج

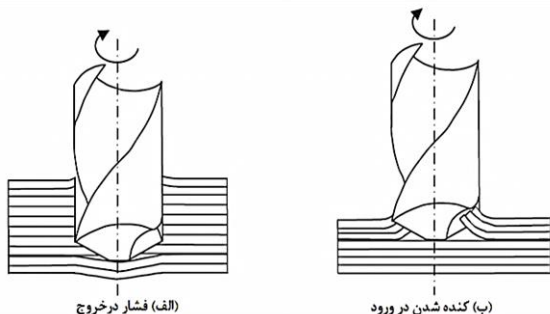


شکل ۵ نمای سه بعدی حرکت ابزار در فرزکاری ماریپیج

در فرزکاری ماریپیج بر خلاف سوراخکاری معمولی، قطر اسمی سوراخ نهایی ترکیبی از قطر ابزار و قطر مسیر ماریپیج است. شکل ۵ سینماتیک فرزکاری ماریپیج را به تصویر کشیده است. در این فرآیند سه نوع حرکت همزمان، شامل چرخش ابزار به دور محور خود، چرخش حول دایره ماریپیج و حرکت محوری وجود دارد [۲۰]. همانطور که در شکل ۵ مشاهده می‌شود در فرآیند فرزکاری ماریپیج محور ابزار و محور سوراخ بر خلاف سوراخکاری معمولی بر هم منطبق نمی‌باشند. این عدم انطباق به علت کاهش تماس بین ابزار و قطعه کار سبب کاهش نیرو و افزایش عمر ابزار می‌باشد. از طرفی با توجه به سینماتیک فرزکاری ماریپیج می‌توان با یک ابزار سوراخ‌هایی با قطرهای بزرگتر از قطر ابزار (تا یک حد مشخص) تولید کرد که خود سبب یکپارچگی فرآیندهای ماشینکاری می‌شود.

۳- انجام آزمایش‌ها و نتایج

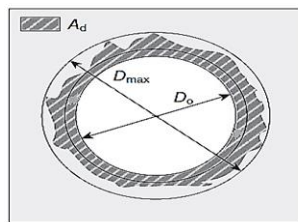
بر خلاف فلزات، کامپوزیت‌ها از دو یا چند فاز با استحکام، سختی و هدایت حرارتی متفاوت ساخته می‌شوند. به علت ناهمسانگردی مواد به کار رفته در کامپوزیت‌ها، اغلب آسیب‌های سوراخکاری ناشی از این تفاوت خواص (بین رزین و الیاف) در مواد کامپوزیتی می‌باشد. با توجه به تحقیقات به عمل آمده از بین مشکلات سوراخکاری، ورقه ورقه شدن مهمترین عامل را به خود اختصاص داده است زیرا تهدید جدی برای قابل اعتماد بودن قطعه برای قرار گرفتن در مجموعه مونتاژی است [۲۱].



شکل ۶ نمای کلی از ورقه ورقه شدن در ورودی و خروجی سوراخ [۱]

ورقه ورقه شدن یکی از نگرانی‌های عمده برای سوراخکاری کامپوزیت‌های FRP است. ورقه ورقه شدن، در هنگام سوراخکاری ناشی از ورود و خروج مته می‌باشد که در شکل ۶ به صورت شماتیک برای سوراخکاری معمولی نشان داده شده است.

ورقه ورقه شدن در سوراخکاری به دو صورت رخ می‌دهد. به جدایش لایه‌ها در هنگام ورود مته کنده شدن در ورود^۱ و به جدایش لایه‌ها در هنگام خروج مته فشار در خروج^۲ گفته می‌شود. در هنگام خروج مته اعمال نیروی محوری مته بر روی لایه‌های جدا نشده، سبب خم شدن الاستیک این لایه‌ها می‌شود. هنگام خروج مته ضخامت این لایه‌های به یک مقدار بحرانی می‌رسد و در نتیجه مقاومت در برابر خمش، ناشی از نیروی مته کاهش پیدا می‌کند. در ضخامت بحرانی، تنش خمشی، بیشتر از نیروی بین لایه‌های می‌شود که این خود سرآغازی برای ایجاد ترک در اطراف سوراخ است [۱]. ورقه ورقه شدن از نوع کنده شدن در ورود، در هنگام ورود مته پس از آنکه لبه برشی با لمینیت تماس برقرار کرد نیروی برشی اعمال شده در جهت محیطی یک نیرویی در راستای محوری به سمت بالا اعمال می‌کند که باعث جدایش لایه‌ای، در صفحه بالایی لمینیت می‌شود [۲۲].



شکل ۷ محدوده ورقه ورقه شدن در سوراخکاری [۲۳]

در شکل ۷، D_{max} : حداکثر قطر ورقه ورقه شدن، D_0 : قطر سوراخ و A_d : مساحت محدوده ورقه ورقه شدن است. با توجه به توضیحات ارائه شده تا کنون چندین رابطه برای اندازه‌گیری این محدوده بیان شده است که عبارت‌اند از:

$$F_d = \frac{D_{max}}{D_0} \quad (1)$$

$$F_{da} = F_d + \frac{A_d}{A_{max} - A_0} (F_d^2 - F_d) \quad (2)$$

در معادله‌های ۱ و ۲، F_d : معیار ورقه ورقه شدن، D_{max} : حداکثر قطر ورقه ورقه شدن، D_0 : قطر سوراخ، F_{da} : معیار بهبود یافته ورقه ورقه شدن، A_d : مساحت محدوده ورقه ورقه شدن، A_{max} : بیشترین مساحت ورقه ورقه شدن و A_0 : مساحت قطر سوراخ است.

در تحقیقات به عمل آمده مشخص شده است که معادله ۲ نسبت، دقیق‌تر و قابلیت اطمینان بیشتری را نسبت به معادله ۱ ارائه می‌کند. اما از آنجایی که برای اندازه‌گیری A_d محدودیت‌هایی وجود دارد، در نتیجه برای استفاده از معادله ۲ به اندازه‌گیری‌های دقیق‌تری نیاز است [۲۴].

برای اندازه‌گیری محدوده ورقه ورقه شدن همواره مشکلاتی وجود داشته است، یکی از راه‌های اندازه‌گیری استفاده از میکروسکوپ نوری برای تجزیه و تحلیل این محدوده می‌باشد. روش دیگر استفاده از تست‌های غیر مخرب مانند اولتراسونیک سی-اسکن برای اندازه‌گیری ورقه ورقه شدن اطراف سوراخ است [۱].

تا کنون معیارهای مختلفی برای ورقه ورقه شدن اطراف سوراخ ارائه شده است؛ که از بین آنها می‌توان به حداکثر قطر ورقه ورقه شدن به قطر سوراخ اشاره کرد. شکل ۷ نمای کلی این موضوع را نشان می‌دهد.

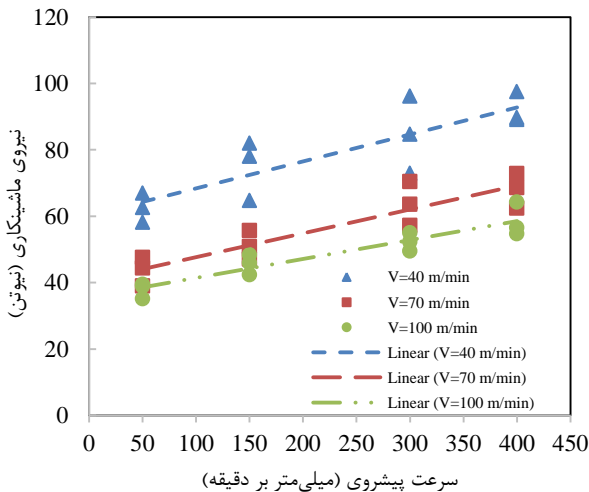
1. peel-up
2. push-out

جدول ۱ پارامترهای ماشینکاری

قطر سوراخ (mm)	سرعت پیشروی (mm/min)	سرعت برشی (V) (m/min)	زاویه شیار ماریچج (mm/rev)
۱۰	۵۰	۴۰	۰/۱۵
-	۱۵۰	۷۰	-
-	۳۰۰	۱۰۰	-
-	۴۰۰	-	-

با توجه به پارامترهای ماشینکاری در جدول ۱، ۱۲ آزمایش طراحی و برای بالا رفتن صحت و دقت خروجی‌های آزمایش، ۳ مرتبه تکرار شد. به طور کلی ۳۶ آزمایش طراحی و اجرا گردید.

در فرآیند فرزکاری ماریچج به علت کاهش ضخامت براده نتراشیده شده و براده‌های بسیار ریز به خاطر وجود سطح تماس کم ابزار و قطعه کار نیروی ماشینکاری، نسبت به فرآیند سوراخ‌کاری معمولی در بازه نیرویی پایین‌تری قرار گرفته است. همچنین کاهش نرخ براده برداری ماده بر واحد زمان در فرزکاری ماریچج را می‌توان از دیگر دلایل این کاهش نیرو نسبت به سوراخ‌کاری معمولی دانست [۲۵]. شکل ۱۰ نیرو در راستای محور پیشروی (F_z) بر اساس سرعت پیشروی، در سرعت‌های برشی مختلف را نشان می‌دهد. همانطور که در شکل ۱۰ ملاحظه می‌شود ابتدا رگرسیون خطی برای هر یک از سرعت‌های برشی و پیشروی با تعداد تکرارهای ذکر شده رسم شد. این رگرسیون خطی بیانگر آن است که افزایش سرعت برشی سبب کاهش نیروی محوری می‌شود و از طرفی افزایش سرعت پیشروی سبب افزایش این نیرو شده است. با افزایش میزان پیشروی، سطح مقطع براده تغییر شکل نیافته افزایش می‌یابد در نتیجه سبب افزایش نیرو می‌شود. افزایش سرعت برشی، دمای ماشینکاری را افزایش می‌دهد و این افزایش دما سبب گرم شدن رزین اپوکسی و در نتیجه کاهش نیروی ماشینکاری می‌شود. شکل ۱۱ و ۱۲ معیار ورقه ورقه شدن در ورودی و خروجی سوراخ را نشان می‌دهد.



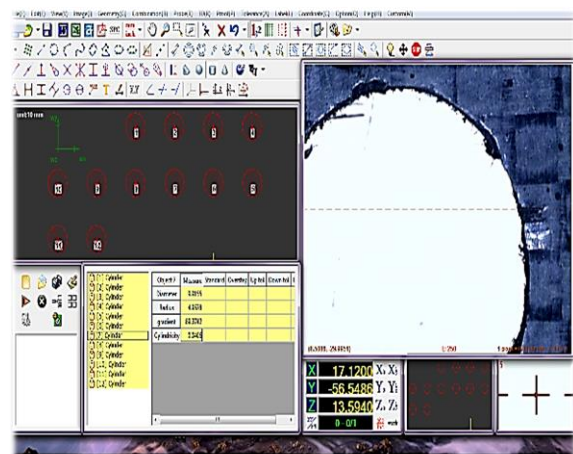
شکل ۱۰ نیروهای ماشینکاری در فرآیند فرزکاری ماریچج

همان‌طور که در شکل ۱۱ و ۱۲ مشخص می‌باشد میزان ورقه ورقه شدن در ورودی و خروجی سوراخ، متناسب با نیروی ماشینکاری تغییر یافته است. همانند نمودار نیرویی پس از به دست آمدن داده‌های آزمایش ابتدا رگرسیون خطی مربوط به هر سرعت برشی و پیشروی رسم شد. میزان ورقه ورقه شدن

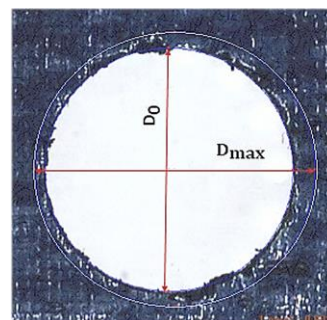
پارامترهای ماشینکاری از قبیل سرعت پیشروی، سرعت برشی، قطر مته، زاویه رأس مته و همچنین نوع پیکربندی مواد کامپوزیتی بر روی ورقه ورقه شدن تأثیر مستقیم دارد. مطالعات زیادی نشان می‌دهد، میزان پیشروی تأثیر بیشتری از ورقه ورقه شدن را به خود اختصاص داده است؛ زیرا میزان پیشروی رابطه مستقیم با نیروی ماشینکاری دارد و عامل اصلی و تأثیرگذار بر روی این مشکل در سوراخ‌کاری، نیروی ماشینکاری است.

در این پژوهش از معادله ۱ با توجه به کاربرد بیشتر آن در تحقیقات انجام شده، استفاده شده است. برای اندازه‌گیری معیار ورقه ورقه شدن طبق معادله ۱ ابتدا باید قطر سوراخ اندازه‌گیری شود. این اندازه‌گیری توسط پرآپ دستگاه VMM-CMM به صورتی تماسی انجام شد. همچنین برای اندازه‌گیری حداکثر قطر ورقه ورقه شدن، نقاط آسیب دیده در اطراف سوراخ توسط نرم افزار دستگاه انتخاب شد و بر اساس این نقاط یک دایره با توجه به دورترین نقطه انتخاب شده از مرکز دایره توسط نرم افزار مشخص گردید. می‌توان این‌گونه بیان کرد برای اندازه‌گیری قطر سوراخ از قسمت CMM دستگاه و برای اندازه‌گیری حداکثر میزان ورقه ورقه شدن از قسمت VMM دستگاه استفاده شده است. شکل ۸ محیط نرم افزار برای این اندازه‌گیری‌ها را نشان می‌دهد.

شکل ۹ محدوده اندازه‌گیری D_0 و D_{max} در یکی از نمونه‌های آزمایش را نشان می‌دهد. برای رسیدن به حالت بهینه در آزمایش‌ها ابتدا پارامترهای مختلف فرآیند فرزکاری ماریچج بر روی قطعه CFRP اجرا گردید. بر طبق این آزمایش‌ها پارامترهای ماشینکاری بر مبنای کمترین نیرو، در حین فرآیند ماشینکاری انتخاب شد. جدول ۱ پارامترهای ماشینکاری را نشان می‌دهد.

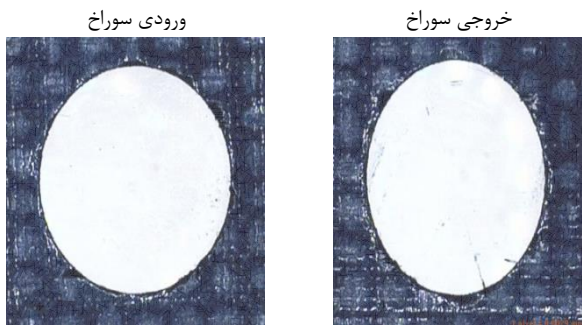


شکل ۸ محیط نرم افزار دستگاه اندازه‌گیری تصویری-مختصات



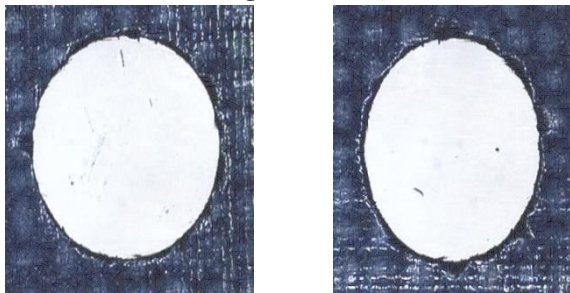
شکل ۹ محدوده اندازه‌گیری میزان ورقه ورقه شدن

می‌شود. طبق معادله ۱ معیار F_d با افزایش دقت سوراخ کاهش پیدا می‌کند. شکل ۱۳ این مطلب را نشان می‌دهد. شکل ۱۴ تصویر ورقه ورقه شدن در برخی از آزمایش‌ها را نشان می‌دهد.



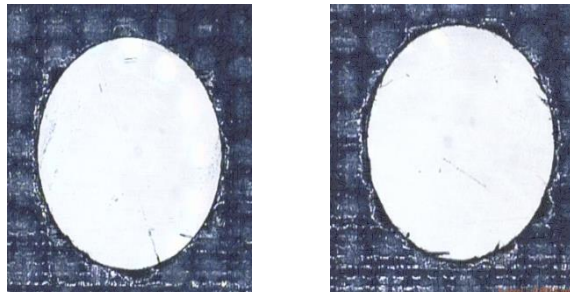
(الف)

سرعت برشی = ۱۰۰ متر بر دقیقه
سرعت پیشروی = ۵۰ میلی‌متر بر دقیقه



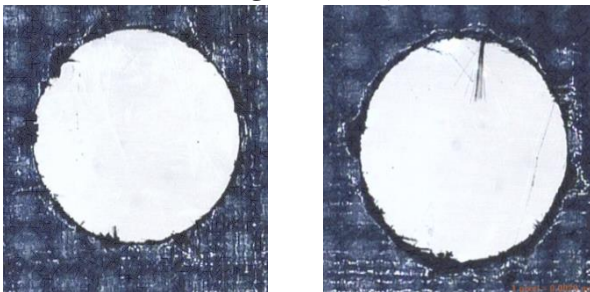
(ب)

سرعت برشی = ۱۰۰ متر بر دقیقه
سرعت پیشروی = ۴۰۰ میلی‌متر بر دقیقه



(ج)

سرعت برشی = ۴۰ متر بر دقیقه
سرعت پیشروی = ۵۰ میلی‌متر بر دقیقه

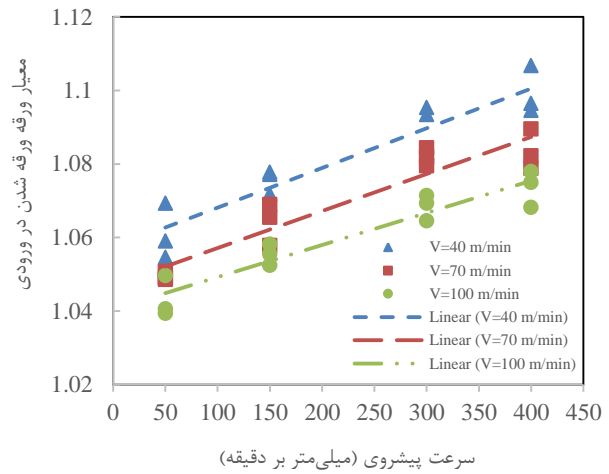


(د)

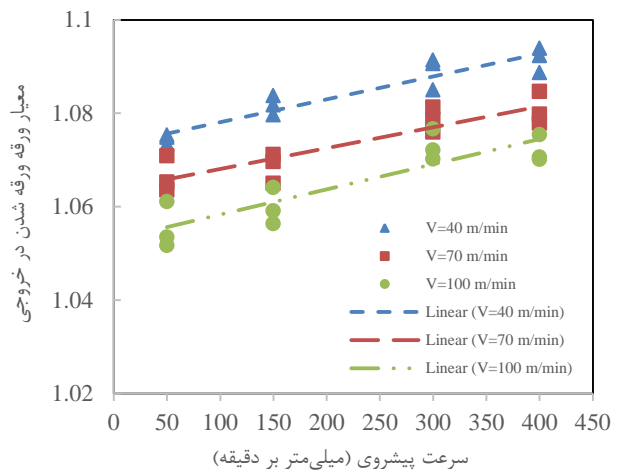
سرعت برشی = ۴۰ متر بر دقیقه
سرعت پیشروی = ۴۰۰ میلی‌متر بر دقیقه

شکل ۱۴ تصاویر ورقه ورقه شدن در ورودی و خروجی سوراخ

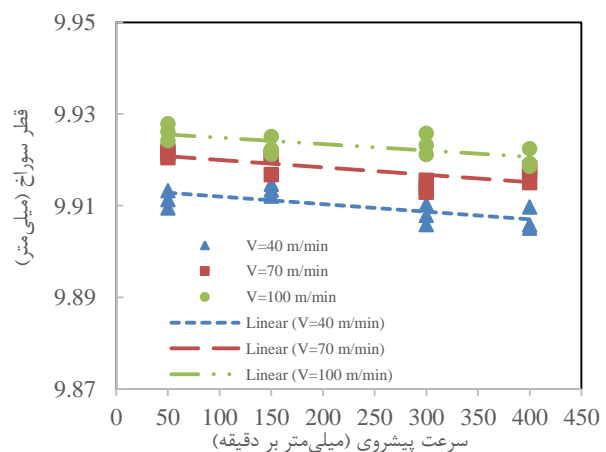
با کاهش نیرو، در ورودی و خروجی سوراخ با توجه به معیار بی‌بعد F_d کاهش و با افزایش نیرو معیار ورقه ورقه شدن افزایش یافته است.



شکل ۱۱ معیار ورقه ورقه شدن در ورودی سوراخ



شکل ۱۲ معیار ورقه ورقه شدن در خروجی سوراخ



شکل ۱۳ تأثیر سرعت برشی و پیشروی بر روی قطر سوراخ

افزایش سرعت برشی، سبب بهبود معیار ورقه ورقه شدن در هنگام ورود و خروج ابزار شده است زیرا با افزایش سرعت برشی نیروی ماشینکاری در یک نرخ پیشروی ثابت کاهش می‌یابد. این کاهش سبب بالا رفتن دقت سوراخ

۳. از آنجایی که معیار ورقه ورقه شدن به قطر سوراخ تولید شده وابسته می‌باشد بنابراین تولید سوراخ با دقت بالا سبب کاهش معیار ورقه ورقه شدن می‌شود. استفاده از سرعت‌های برشی بالا و میزان پیشروی پایین دقت سوراخ تولید شده را افزایش می‌دهد.
۴. مساحت محدوده ورقه ورقه شدن در خروجی سوراخ به علت کاهش ضخامت قطعه کار بیشتر از ورودی سوراخ است.

۵- مراجع

- [1] Sheikh-Ahmad, Y. J., "Machining of Polymer Composites, Springer," pp. 187-210, 2009.
- [2] Ishida, T. Noma, K. Kakinuma, Y. Aoyama, T. Hamada, S. Ogawa, H. and Higaino, T., "Helical Milling of Carbon Fiber Reinforced Plastics Using Ultrasonic Vibration and Liquid Nitrogen," *Procedia CIRP*, Vol. 24, pp. 13-18, 2014.
- [3] Henerichs, M. Voß, R. Harsch, D. Kuster, F. and Wegener, K., "Tool Life Time Extension with Nano-Crystalline Diamond Coatings for Drilling Carbon-Fibre Reinforced Plastics (CFRP)," *Procedia CIRP*, Vol. 24, pp. 125-129, 2014.
- [4] Khairusshima, M. N. Hassan, C. C. Jaharah, A. G. Amin, A. K. M. and Idriss, A. M., "Effect of Chilled Air on Tool Wear and Workpiece Quality During Milling of Carbon Fibre-Reinforced Plastic," *Wear*, Vol. 302, No. 1, pp. 1113-1123, 2013.
- [5] Klotz, S. Gerstenmeyer, M. Zanger, F. and Schulze, V., "Influence of Clamping Systems During Drilling Carbon Fiber Reinforced Plastics," *Procedia CIRP*, Vol. 13, pp. 208-213, 2014.
- [6] Liu, J. Chen, G. Ji, C. Qin, X. Li, H. and Ren, C., "An Investigation of Workpiece Temperature Variation of Helical Milling for Carbon Fiber Reinforced Plastics (CFRP)," *International Journal of Machine Tools and Manufacture*, Vol. 86, pp. 89-103, 2014.
- [7] Klotz, S. Zanger, F. and Schulze, V., "Influence of Clamping Systems during Milling of Carbon Fiber Reinforced Composites," *Procedia CIRP*, Vol. 24, pp. 38-43, 2014.
- [8] Denkena, B. Boehnke, D. and Dege, J. H., "Helical Milling of CFRP-Titanium Layer Compounds," *CIRP Journal of manufacturing Science and Technology*, Vol. 1, No. 2, pp. 64-69, 2008.
- [9] Teicher, U. Müller, S. Münzner, J. and Nestler, A., "Micro-Edm of Carbon Fibre-Reinforced Plastics," *Procedia CIRP*, Vol. 6, pp. 320-325, 2013.
- [10] Henerichs, M. Voß, R. Kuster, F. and Wegener, K., "Machining of Carbon Fiber Reinforced Plastics: Influence of Tool Geometry and Fiber Orientation on the Machining Forces," *CIRP Journal of Manufacturing Science and Technology*, Vol. 9, pp. 136-145, 2015.
- [11] Liu, J. Zhang, D. Qin, L. and Yan, L., "Feasibility Study of the Rotary Ultrasonic Elliptical Machining of Carbon Fiber Reinforced Plastics (CFRP)," *International Journal of Machine Tools and Manufacture*, Vol. 53, No. 1, pp.141-150, 2012.
- [12] Walter, J. Hustedt, M. Staehr, R. Kaierle, S. Jaeschke, P. Suttmann, O. and Overmeyer, L., "Laser Cutting of Carbon Fiber Reinforced Plastics- Investigation of Hazardous Process Emissions," *Physics Procedia*, Vol. 56, pp. 1153-1164, 2014.
- [13] Zemann, R. Kain, L. and Bleicher, F., "Vibration Assisted Machining of Carbon Fibre Reinforced Polymers," *Procedia Engineering* Vol. 69, pp.536-543, 2014.
- [14] Riveiro, A. Quintero, F. Lusquiños, F. del Val, J. Comesaña, R. Boutinguiza, M. and Pou, J., "Experimental Study on the CO 2 Laser Cutting of Carbon Fiber Reinforced Plastic Composite," *Composites Part A: Applied Science and Manufacturing*, Vol. 43, No. 8, pp. 1400-1409, 2012.
- [15] Amini, S. Shamoto, E. Suzuki, N. And Nategh, MJ., "FE Analysis of one-Directional and Elliptical Vibration Cutting Processes," *International Journal of Automation Technology*, Vol. 4, No.3, pp. 1-7, 2010.
- [16] Soleimanimehr, H. Nategh, MJ. And Amini, S., "Prediction of Machining Force and Surface Roughness in Ultrasonic Vibration-Assisted Turning Using Neural Networks," *Advanced Materials Research*, Vol.83, pp. 326-334, 2010.
- [17] Barani, A. Amini, S. Paktinat, H. And Tehrani, AF, "Built-up Edge Investigation in Vibration Drilling of Al2024-T6," *Ultrasonics*, Vol.54, No.5, pp. 1300-1310, 2014.
- [18] Amini, S. Khosrojerdi, MR. Nosouhi, R. And Behbahani, S., "An Experimental Investigation on the Machinability of Al203 in Vibration-Assisted Turning Using PCD Tool," *Materials and Manufacturing Processes*, Vol.29, No.3, pp. 331-336, 2014.
- [19] Amini, S. And Mohagheghian, N., "Vibratory Rotary Turning Process of Al 7075 Workpiece. *Journal of Materials and Manufacturing Processes*," Vol.29, pp.344-349, 2014.
- [20] Saadatbakhsh, M. H. Rasti, A. Sadeghi, M. H. Hassanpour, H. and Omiddodman, A., "Empirical Study of Dimensional and Geometrical Tolerances in Helical Milling of AISI 4340 Steel," *In Persian, Modares Mechanical Engineering*, Vol. 14, No. 15, pp. 119-126. 2015.
- [21] Hocheng, H., "Machining Technology for Composite Materials," *Woodhead Publishing Limited*, pp. 19-59, 2012.

شکل ۱۳ بیانگر این موضوع است که با افزایش سرعت برشی دما در ناحیه سوراخکاری افزایش پیدا می‌کند. علت این افزایش دما اصطکاک بیشتر بین ابزار و قطعه کار در سرعت‌های برشی بالاتر می‌باشد [۶،۱]. این افزایش دما سبب گرم شدن رزین می‌شود و این شرایط سبب بهبود و بالا رفتن دقت سوراخ می‌گردد. از طرفی افزایش میزان پیشروی باعث می‌شود، نیروی در فرآیند فرزکاری ماریچ افزایش و به دنبال این افزایش ابزار از مسیر خود منحرف شود. همچنین این افزایش نیرو ارتعاشات بیشتری را در حین سوراخکاری به همراه دارد که شرایط بحرانی‌تری را پدید می‌آورد.

شکل ۱۴ نشان می‌دهد، به طور کلی مساحت محدوده ورقه ورقه شدن در ورودی سوراخ کمتر از خروجی سوراخ است. در هنگام خروج ابزار از قطعه ضخامت قطعه کار به یک مقدار بحرانی می‌رسد و این سبب کاهش میزان استحکام خمشی لمینیت‌ها در برابر نیروی ماشینکاری می‌شود. این کاهش استحکام باعث می‌شود در انتهای سوراخ به جای ماشینکاری، حرکت رو به پایین ابزار و نیروی ماشینکاری سبب کنده شدن قطعه گردد [۱]. از طرفی در هنگام ورود ابزار ضخامت قطعه کار بیشتر از انتهای سوراخ است و موجب افزایش استحکام خمشی لمینیت‌ها در برابر نیروی ماشینکاری و جلوگیری از کنده شدن قطعه می‌شود در نتیجه محدوده ورقه ورقه شدن نسبت به خروجی سوراخ کاهش می‌یابد. مقایسه بین قسمت‌های الف و ب، و مقایسه بین قسمت‌های ج و د، در شکل ۱۴ نشان می‌دهد. افزایش میزان پیشروی در یک سرعت برشی ثابت سبب افزایش محدوده ورقه ورقه شدن در ورودی و خروجی سوراخ به علت افزایش نیروی ماشینکاری می‌شود. همچنین افزایش سرعت برشی در یک سرعت پیشروی ثابت به علت کاهش نیروی ماشینکاری محدوده ورقه ورقه شدن در ورودی و خروجی سوراخ را کاهش می‌دهد.

در فرآیند فرزکاری ماریچ به علت کاهش تماس بین ابزار و سطح قطعه کار نیروی ماشینکاری نسبت به سوراخکاری معمولی کاهش می‌یابد. از آنجا که محدوده ورقه ورقه شدن وابسته به نیروی ماشینکاری است، با کاهش نیرو این محدوده نیز کاهش پیدا می‌کند. معیار ورقه ورقه شدن علاوه بر وابسته بودن به نیروی ماشینکاری به قطر نهایی سوراخ تولید شده نیز وابسته است. در نتیجه برای کاهش محدوده ورقه ورقه شدن و معیار آن، انتخاب بهینه پارامترهای ماشینکاری از اهمیت بالایی برخوردار است. روند این پژوهش نشان داد افزایش سرعت برشی و کاهش میزان پیشروی در فرآیند فرزکاری ماریچ سبب کاهش معیار ورقه ورقه شدن می‌شود.

۴- نتیجه‌گیری

در این پژوهش سوراخکاری به روش فرزکاری ماریچ که یکی از روش‌های نوین سوراخکاری است، بر روی کامپوزیت‌های پلیمری تقویت شده با الیاف کربن با توجه به گسترش روز افزون و کاربرد وسیع این مواد در صنایع مختلف انجام شد. پس از انجام آزمایش‌ها نتایج زیر حاصل گردید.

۱. نیرو در فرآیند فرزکاری ماریچ با افزایش پیشروی به علت افزایش سطح مقطع براده تغییر شکل نیافته، افزایش یافته است و با افزایش میزان سرعت برشی نیرو به علت کاهش اصطکاک و افزایش دما، کاهش پیدا می‌کند.
۲. معیار ورقه ورقه شدن رابطه مستقیم با نیروی محوری در حین سوراخکاری دارد. افزایش پیشروی نیروی سوراخکاری را افزایش می‌دهد و با این افزایش میزان ورقه ورقه شدن نیز افزایش می‌یابد ولی با افزایش سرعت برشی، نیرو روند نزولی پیدا کرده و سبب کاهش میزان ورقه ورقه شدن می‌شود.

- [22] Davim, J. P. and Reis, P., "Study of Delamination in Drilling Carbon Fiber Reinforced Plastics (CFRP) using design experiments," *Composite Structures*, Vol. 59, pp. 481-487, 2003.
- [23] Tsao, C. C. Kuo, K. L. and Hsu, I. C., "Evaluation of Novel Approach on Delamination Factor after Drilling Composite Laminates," In *Key Engineering Materials*, Vol. 443, pp. 626-630. 2010.
- [24] Davim, J. P. Rubio, J. C. and Abrao, A. M., "A novel Approach Based on Digital Image Analysis to Evaluate the Delamination Factor after Drilling Composite Laminates," *Composites Science and Technology*, Vol. 67, No. 9, pp. 1939-1945, 2007.
- [25] Saadatbakhsh, M. H. Rasti, A. Sadeghi, M. H. Hassanpour, H. and Omiddodman, A., "Compare and Study of Hole Quality Characteristics in Helical Milling and Conventional Drilling," In Persian, *Madares Mechanical Engineering*, Vol. 99, No, 9, pp. 1-11, 2014.